



国防科工委“十五”规划教材·光学工程

# 激光原理技术及应用

李相银 姚敏玉 李卓 崔骥 编著

**哈尔滨工业大学出版社**

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书从激光应用角度考虑,系统地介绍了激光形成的基本原理、基本的激光器件、基本的激光技术及应用。主要内容包括激光的原理及技术基础、激光工作物质及基本原理、光学谐振腔、激光器工作原理、典型的激光器件、其他激光器、激光技术、激光技术器件的设计及选用原则、激光器件及激光技术实验、激光技术在国防科技领域中的应用、激光技术在工业及其他方面的应用。书中融入了一些高新技术的基本原理及方法,启发性、研究性、实用性强。

本书可作为高等院校应用物理、光信息科学与技术、光电仪器、电子科学与技术以及机械、化工、电子类专业本科生的专业基础课教材,也可供高等院校相关专业工程硕士以及从事教学、科研工作的人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

激光原理技术及应用/李相银等编著. —哈尔滨:哈尔滨

工业大学出版社,2004.10

ISBN 7-5603-2088-0

I. 激… II. 李… III. 激光理论-高等学校-教材

IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 100904 号

## 激光原理技术及应用

编 著 李相银 姚敏玉 李卓 崔骥

责任编辑 潘 鑫

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451—86414749

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 28 字数 569 千字

版 次 2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-2088-0/O•173

印 数 1~3 000

定 价 36.00 元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编 委:王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其它技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替



代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影晌。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振



兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

融华祝



# 前 言

自1960年美国梅曼先生首先研制成功红宝石激光器以来,激光作为一门新颖科学技术发展极快,迄今已渗透到几乎所有的自然科学领域,对物理学、化学、生物学、医学、工艺学、园艺学以及检测技术、通信技术、军事技术等都产生了深刻的影响。许多不同专业的科学技术工作者和理工科大学生希望获得比较完整的激光知识,以便于在自己的专业中引进激光,推动自身专业的发展。本书内容安排贯穿着培养研究型学习能力是培养创新能力的重要基础这一主线,在参阅许多资料的基础上,将激光原理、激光技术、激光器件及应用知识融为一体。在编排的内容上充分考虑到理工科有关专业特点及面向教学的需要,其内容面广、内容新、实用性强,尤其是一些高新技术内容,更具有启发性、研究性、实用性。

本教材的参考学时数为48学时(不含实验)。全书共分5个部分(共11章)。第一部分(第一至四章)激光基本原理,包括激光的原理及技术基础,激光工作物质及基本原理,光学谐振腔,激光器工作原理;第二部分(第五、六章)激光器件,包括典型的激光器件,其他激光器;第三部分(第七、八章)激光技术(光波的调制,电光调制,声光调制,磁光效应与磁光隔离器,调 $Q$ 技术,锁模技术,选模技术,稳频技术)、光电技术器件的设计及参数选用原则(光偏转器,光隔离器,光电探测器,光纤维,光学天线,激光倍频与光参量放大,光学元件的损伤);第四部分(第九章)激光器件及激光技术实验(激光能量测量,激光发散角测量,激光波长的测量,激光谱线宽度测量,激光声光调 $Q$ 实验,激光电光调 $Q$ 技术实验,激光倍频技术实验,TEA-CO<sub>2</sub>激光器实验);第五部分(第十、十一章)激光技术在国防科技领域的应用(激光目标的反射及散射特性,激光测距与激光雷达技术,激光测距在炸高测量中的应用,激光遥感技术,激光通信技术,激光与光纤陀螺,激光制导技术,激光隐身技术)和激光技术在工业及其他方面的应用。



本书是按照国防科工委教材编写指导小组确定的编写大纲编写的专业基础课教材,凡具有大学物理、高等数学等基础知识的读者均可以顺利阅读。在教材编写中,既照顾激光原理及技术的完整性并兼顾可读性和实用性,又充分考虑到阅读和教学安排上的选择性,本书各部分的内容基本上是相互独立的。根据不同专业特点及实际需要出发,可灵活选择讲授的内容。在内容安排上,还编入了一定量的激光实验,且每章后面附有少量的习题与思考题供学习选用,以求更好地做到理论与实际相结合。本书可作为高等院校应用物理、光信息科学与技术、光电仪器类专业的教材,也可供高等院校相关专业工程硕士及从事教学、科研工作的人员参考。

本书第一、三章由南京理工大学李相银、史林兴编写,第二、四章由清华大学姚敏玉编写,第五、六、七(7.1~7.5节)章由北京理工大学李卓、杨苏辉编写,第七(7.6~7.8节)、八、十一章由李相银、张晓编写,第十章由李相银、汤文斌和南京炮兵学院刘士军、贺文彪编写,第九章由南京理工大学崔骥编写。李相银统编全稿。在编写过程中,参阅了一些编著者的著作和文章,在参考文献中未能一一列出,谨在此一并向他们表示诚挚的感谢和敬意。

由于编者水平有限,书中难免还存在缺点和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编者  
2003年9月

# 目 录

<b>第一章 激光的原理及技术基础</b> .....	1
1.1 激光的特点 .....	1
1.2 激光的产生 .....	4
1.3 激光器的基本组成 .....	7
1.4 光线在谐振腔内的行为和腔的稳定条件 .....	11
1.5 激光振荡模式 .....	14
1.6 光腔的损耗和激光振荡的阈值条件 .....	17
习题与思考题 .....	21
参考文献 .....	22
<b>第二章 激光工作物质及基本原理</b> .....	23
2.1 黑体辐射与普朗克公式 .....	23
2.2 光和物质的三种相互作用及爱因斯坦关系式 .....	24
2.3 谱线加宽及谱线宽度 .....	27
2.4 激光器速率方程 .....	41
2.5 增益系数与增益饱和 .....	44
习题与思考题 .....	53
参考文献 .....	54
<b>第三章 光学谐振腔</b> .....	55
3.1 共焦腔中的光束特性 .....	55
3.2 共焦光学谐振腔中基模的分布 .....	61
3.3 谐振腔中高阶振荡模 .....	68
3.4 高斯光束通过薄透镜时的变换及传输规律 .....	71
3.5 介稳共振腔结构与特性 .....	82
3.6 非稳腔结构及特性 .....	87
习题与思考题 .....	94
参考文献 .....	97
<b>第四章 激光器工作原理</b> .....	98
4.1 激光产生的阈值条件 .....	98
4.2 连续激光器的工作特性 .....	103
4.3 连续激光器的输出功率和最佳透过率 .....	106



4.4	脉冲激光器工作特性	111
4.5	激光放大器	114
	习题与思考题	124
	参考文献	126
<b>第五章</b>	<b>典型的激光器件</b>	127
5.1	激光器的分类及特点	127
5.2	固体激光器	130
5.3	气体激光器	144
5.4	半导体激光器	156
	习题与思考题	170
	参考文献	171
<b>第六章</b>	<b>其他激光器</b>	173
6.1	孤子激光器	173
6.2	自由电子激光器	178
6.3	化学激光器	182
	习题与思考题	186
	参考文献	186
<b>第七章</b>	<b>激光技术</b>	187
7.1	光波的调制	187
7.2	电光调制	197
7.3	声光调制	211
7.4	磁光效应与磁光隔离器	218
7.5	调 $Q$ 技术	225
7.6	锁模技术	248
7.7	选模技术	256
7.8	稳频技术	260
	习题与思考题	268
	参考文献	271
<b>第八章</b>	<b>光电技术器件的设计及参数选用原则</b>	272
8.1	激光偏转器	272
8.2	光隔离器	278
8.3	光电探测器	280
8.4	光纤维	290
8.5	光学天线	297
8.6	激光倍频及光参量放大	299



8.7 光学元件的损伤 .....	309
习题与思考题 .....	314
参考文献 .....	315
<b>第九章 激光器件及激光技术实验 .....</b>	<b>316</b>
9.1 激光能量测量 .....	316
9.2 激光发散角测量 .....	325
9.3 激光波长的测量 .....	327
9.4 激光谱线宽度测量 .....	331
9.5 激光声光调 $Q$ 技术实验 .....	335
9.6 激光电光调 $Q$ 技术实验 .....	338
9.7 激光倍频技术实验 .....	343
9.8 TEA - CO <sub>2</sub> 激光器实验 .....	345
习题与思考题 .....	350
参考文献 .....	351
<b>第十章 激光技术在国防科技领域中的应用 .....</b>	<b>353</b>
10.1 激光目标的反射及散射特性 .....	353
10.2 激光测距与激光雷达技术 .....	358
10.3 激光测距在炸高测量中的应用 .....	369
10.4 激光遥感技术 .....	370
10.5 激光通信技术 .....	373
10.6 激光与光纤陀螺 .....	379
10.7 激光制导技术 .....	384
10.8 激光隐身技术 .....	393
习题与思考题 .....	400
参考文献 .....	401
<b>第十一章 激光技术在工业及其他方面的应用 .....</b>	<b>402</b>
11.1 激光三维传感技术 .....	402
11.2 激光在线测径 .....	409
11.3 激光在线测厚 .....	411
11.4 环境对激光工业检测的影响 .....	413
11.5 激光在化学中的应用 .....	414
11.6 激光技术在生物医学中的应用 .....	422
习题与思考题 .....	430
参考文献 .....	431

# 第一章 激光的原理及技术基础

## 1.1 激光的特点

激光译自英语 laser。它是英语词组 light amplification by stimulated emission of radiation (通过受激发射的放大光)的缩写。该词确切地描述了激光的作用原理。

激光辐射具有一系列与普通光不同的特点,直观地观察,激光具有高定向性、高单色性或高相干性特点。用辐射光度学的术语描述,激光具有高亮度特点。用统计物理学的术语描述,激光则具有高光子简并度特点。从电磁波谱的角度来描述,激光是极强的紫外、可见或红外相干辐射,且具有波长可调谐(连续变频)等特点。

### 一、高方向性(高定向性)和空间相干性

激光方向性好是由其产生的物理过程决定的。在激光诞生前,所有各类光源发出的光都是非定向性的,向空间四面八方辐射,不能集中在确定的方向上发射到较远的地方。采用定向聚光反射镜的探照灯,其发射口径为 1 m 左右,由其会聚的光束的平面发散角约为 10 rad,即光束传输到 1 km 外,光斑直径已扩至 10 m 左右。激光器发出光束的定向性在数量级上大为提高。输出单横模的激光器所发出的光束经过发射望远镜的光束口径同样为 1m,由衍射极限角所决定的平面发散角只有  $10^{-6}$  rad,即光束传输至  $10^3$  km 外,光斑直径仅仅扩至几米。定向性好是激光的重要优点,表示光能集中在很小的空间传播,能在远距离获得强度很大的光束,从而可以进行远距离激光通信、测距、导航等。

在实际应用中,通常是根据激光束沿光传播路径上,光束横截面内的功率或者能量在空间二维方向上的分布曲线的宽度来确定平面发散角的大小。

在近似情况下,激光器输出的平面发散角等于光束的衍射角,则有

$$\theta = \theta_{\text{衍}} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1.1)$$

式中  $\lambda$ ——波长;

$D$ ——光束直径。

$\theta$  取值单位一般以弧度或毫弧度表示,一般情况下,  $\theta > \theta_{\text{衍}}$ 。

而立体发散角等于

$$\Omega = \Omega_{\text{衍}} = \left( \frac{\lambda}{D} \right)^2 \quad (1.2)$$



其取值单位为球面度。

设激光束平面发散角为  $\theta$ ，在光源处的光束直径为  $D$ ，波长为  $\lambda$ ，则光束传输  $L$  距离后，光束直径  $W$  增加为（当  $L \gg 0$  时）

$$W_L = L \cdot \theta \approx 1.22 \frac{L\lambda}{D} \quad (1.3)$$

研究表明，光的相干特性可区分为空间相干性和时间相干性。空间相干性又可称为横向相干性，由所谓横向相干长度  $D_{\text{相干}}$  来表征，其大小由光束的平面发散角  $\theta$  决定，即

$$D_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta} \quad (1.4)$$

$D_{\text{相干}}^2$  定义为相干截面  $S_{\text{相干}}$ ，即

$$S_{\text{相干}} = D_{\text{相干}}^2 \quad (1.5)$$

上式的物理意义是，在光束整个截面内的任意两点间具有完全确定的相位关系的光场振动是完全相干的。

测量激光定向性的最简单方法是打靶法。该方法的具体步骤是，在激光传输的光路上，放一个长焦距透镜  $L$ ，并在其焦平面上放一个定标的靶（单位烧蚀质量上所需能量的多少是已知的），根据靶材的破坏程度，如烧蚀的质量、孔径和穿透深度，来估算激光的定向性，见图 1.1。

假设当发散角为  $\theta$  (rad) 时烧蚀孔直径为  $D$  (mm)，则  $\theta \approx \frac{D}{f}$ ，其中  $f$  是透镜焦距，单位是 mm。

由图 1.1 知， $\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{D}{2f}$ ，当  $\theta$  很小时， $\frac{\theta}{2} \approx \frac{D}{2f}$ 。打靶法较为直观，但较粗糙。

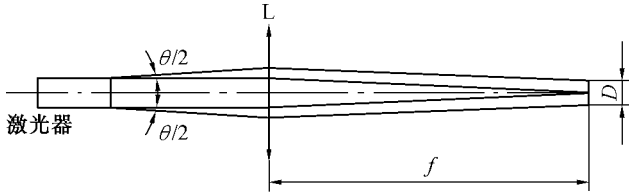


图 1.1 打靶法测量定向性示意图

测量激光定向性除了打靶法外，还有套孔法、光楔法和圆环法。它们均能获得较高的精度，并能较正确地反映激光强度随发散角分布的情况，但是，这些方法不够直观，操作复杂，实验室很少采用。

## 二、单色性和时间相干性

以激光辐射的谱线宽度表征辐射的单色性和激光的相干时间。设单一自发辐射谱线宽度为  $\Delta\nu$  或  $\Delta\lambda$ ，中心频率和波长分别为  $\nu$  和  $\lambda$ ，则单色性量度常用比值  $\frac{\Delta\nu}{\nu}$  或  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  来表征。单色性和相干时间  $\tau_{\text{相干}}$  之间存在简单关系，即



$$\tau_{\text{相干}} = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (1.6)$$

即单色性越高,相干时间越长。有时还用所谓纵向相干长度  $L_{\text{相干}}$  来表示相干时间,则有

$$L_{\text{相干}} = \tau_{\text{相干}} \cdot c = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1.7)$$

式中  $c$ ——光速;

$L_{\text{相干}}$ ——光波在相干时间  $\tau_{\text{相干}}$  内传播的最大光程。

上式的物理意义是在小于和等于此值的空间延时范围内,被延时的光波和后续光波应当完全相干。

在普通光源中,单色性最好的光源是氪同位素  $86(\text{Kr}^{86})$  灯发出的波长  $\lambda = 0.6057 \mu\text{m}$  ( $605.7 \text{ nm}$ ) 的光谱线。在低温下,其谱线半宽度  $\Delta\lambda = 0.47 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ ,单色性程度为  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$ 量级。这表明用这种光去进行精密干涉测长,最大量程不超过  $1 \text{ m}$ ,测量误差为  $1 \mu\text{m}$  左右。这与激光的单色性相比相差甚远。例如,单模稳频的氦氖激光器发出的波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  的光谱线,其谱线半宽度  $\Delta\lambda < 10^{-12} \mu\text{m}$ ,输出的激光单色性可达  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级。用这种激光去进行干涉测长,量程可扩展到  $1000 \text{ km}$ ,其测量误差小于  $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}$  量级。利用激光的高单色性,不仅能极大地提高各种光学干涉测量方法的精度和量限,而且还提供了建立以激光为标准的新的长度、时间和频率标准的稳定性。以高单色性的激光作为光频相干电磁波,可同时传送地球上所有电视台、广播电台的节目及所有电话间的对话信息。此外,还可对各种物理、化学、生物学等过程进行高选择性的光学激发,达到对有关过程进行深入研究和控制的目的。

测量波长,在毫米波段上利用微波测量技术,在红外和可见光波段上应用光谱测量技术,尤其是干涉光谱测量技术,也可用差拍和外差的射频测量技术。

### 三、高亮度和光子简并度

对激光辐射而言,由于发光的高定向性、高单色性等特点,决定了它具有极高的单色定向亮度值。光源的单色亮度  $B_\nu$  定义为单位截面、单位频带宽度和单位立体角内发射的功率

$$B_\nu = \frac{\Delta P}{\Delta S \Delta\nu \Delta\Omega} \quad (1.8)$$

式中,  $\Delta P$  是光源的面元为  $\Delta S$ 、频带宽度为  $\Delta\nu$  和立体角为  $\Delta\Omega$  时所发射的光功率;  $B_\nu$  的量纲为瓦/(厘米<sup>2</sup>·球面度·赫兹)。

对于太阳光辐射而言,在波长  $500 \text{ nm}$  附近  $B_\nu \approx 2.6 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ ,其数值低,是有限的功率分布在空间各个方向以及极其广阔的光谱范围内的结果。对于激光辐射来讲,一般气体激光器定向亮度  $B_\nu = 10^{-2} \sim 10^2 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ ,一般固体激光器  $B_\nu = 10 \sim 10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ ,调  $Q$  大功率激光器  $B_\nu = 10^4 \sim 10^7 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 。



对于激光辐射而言,尤其重要的是激光功率或能量可以集中在少数的波型(单一或少数模式)之内,因而具有极高的光子简并度,这是激光区别于普通光源的重要特点,也就是说高的光子简并度是激光的本质,它表示有多少个性完全相同的光子(具有相同的能量、动量与偏振)共处于一个波型(或模式)之内,这种处于同一光子态的光子数称为光子简并度。从对相干性的光子描述出发,相干光强决定于相干性光子的数目或同态光子的数目。因此,光子简并度具有以下几种相同的涵义:同态光子数,同一模式内的光子数,处于相干体积内的光子数,处于同一相格内的光子数。

设激光单色辐射的光功率为  $\Delta P$ , 中心波长为  $\lambda$ , 光源的面元为  $\Delta S$ , 立体发散角为  $\Delta\Omega$ , 激光振荡的总频率范围为  $\Delta\nu$ , 则光子简并度  $\bar{n}$  为

$$\bar{n} = \frac{\Delta P}{(2h\nu/\lambda^2) \cdot \Delta S \cdot \Delta\Omega \cdot \Delta\nu} \quad (1.9)$$

将式(1.8)代入上式,得

$$\bar{n} = \frac{B_\nu}{2h\nu/\lambda^2} \quad (1.10)$$

或

$$B_\nu = \frac{2h\nu}{\lambda^2} \bar{n} \quad (1.11)$$

从上几式相比较可看出,单色定向亮度与光子简并度是两个彼此相当的物理量,都是同时综合地表示光源辐射的定向性( $\Omega$ )、单色性( $\Delta\nu$ )和功率密度( $P/S$ )的重要参量,但从激光物理过程来说,无疑光子简并度是更本质、更直接的物理量。根据式(1.10)可算出几种类型激光器在  $\lambda = 500 \text{ nm}$  时的光子简并度为:一般气体激光器  $\bar{n} = 10^8 \sim 10^{12}$ , 一般固体激光器  $\bar{n} = 10^{11} \sim 10^{13}$ , 调  $Q$  大功率激光器  $\bar{n} = 10^{14} \sim 10^{17}$ 。

## 1.2 激光的产生

### 一、原子能级

原子是由一个带正电荷的原子核和一个或若干个带负电荷的电子组成,原子核所带的正电量与各个电子所带的负电量之和相等,整个原子呈电中性。不同元素的原子所具有的电子数目是不同的。氢原子只有1个电子,氦原子有18个电子。原子内部少了一个或几个电子则成正离子,反之成负离子。氦原子少了一个电子就成氦离子。离子总是带电荷的,不是带正电荷就是带负电荷。

分子是由原子组成的,为了便于讨论,暂以原子为例,所得结论适用于离子和分子。

电子总是围绕着原子核不停地运动,这就使它有了动能。原子核与电子之间由于带不同极性的电荷,因而互相吸引,使电子带有位能。电子的动能和位能之和,叫做原子的内能。



原子内部各个电子绕原子核做轨道运动的同时,还做自旋运动。原子内部的电子可以通过与外界交换能量从一种运动状态改变为另一种运动状态,对于每一种运动状态,原子具有确定的且不连续的内部能量值,称原子的每一个内部能量值为原子的一个能级。同一元素的原子,能级情况相同。

图 1.2 以原子的两个能级  $E_2$  和  $E_1$  为例,纵坐标表示原子内部能量  $E$  的大小,将能量大的能级称为上能级,能量小的能级称为下能级,或称为激光上能级、激光下能级。原子内部能量最小的能级称为基态,如图 1.2 中的能级  $E_1$ 。一般情况下,绝大多数的原子处于基态。能量比基态高的其他能级都称为激发态,如图 1.2 中的能级  $E_2$ 。

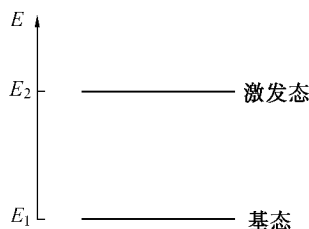


图 1.2 原子能级

产生激光的典型能级有三能级和四能级系统。

## 二、三能级系统

图 1.3 为三能级系统简图,其中  $E_1$  为基态能级,  $E_2$  为激光输出能级(亚稳态能级),  $E_3$  为抽运(泵浦)激光上能级。

由于基态能级  $E_1$  粒子受到外界泵浦的作用,吸收了外来能量,从  $E_1$  被抽运到  $E_3$ 。但是,跃迁到  $E_3$  上的粒子在该能级停留时间很短,很快无辐射跃迁到  $E_2$  能级上。粒子从  $E_3$  能级向  $E_2$  能级跃迁时,既不发射光子,也不吸收光子,多余能量是以热的形式放出的。由于  $E_2$  能级是亚稳态能级(粒子在该能级上停留时间长),所以激励的原子源源不断地从  $E_1$  到  $E_3$ ,再从  $E_3$  到  $E_2$ ,最后使  $E_2$  上粒子大于  $E_1$  上粒子时,在  $E_2$  和  $E_1$  能级间实现了粒子数反转,且  $E_2$  上粒子跃迁回  $E_1$  时便产生受激辐射,从而产生激光。可见,亚稳态能级在实现粒子数反转中起着重要的作用。

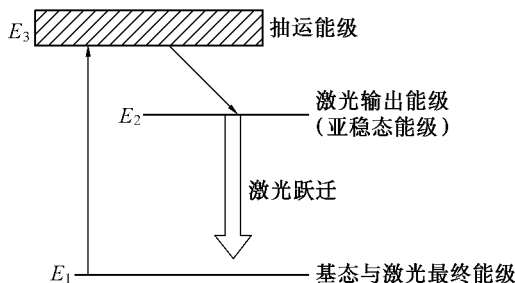


图 1.3 三能级系统简图

典型的红宝石激光器就属于三能级系统。在三能级系统中,由于激光最终能级是基态,为了达到粒子数反转,必须把半数以上的粒子抽运到上能级,因此要求很高的抽运功率。

## 三、四能级系统

原子的四能级系统简图见图 1.4,其中  $E_4$  为抽运能级,  $E_3$  为激光输出能级,  $E_2$  为激光最终能级(在热平稳状态下处于  $E_2$  上的粒子数很少,基

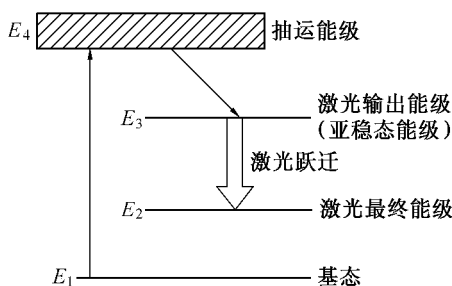


图 1.4 四能级系统简图



本上是个空能级),  $E_1$  为基态能级, 这样在  $E_3$  和  $E_2$  之间比较容易实现粒子数反转。所以四能级系统的激光阈值一般比三能级系统小。

典型的  $\text{Nd}^{3+} - \text{YAG}$  激光器、钕玻璃激光器等都属于四能级系统。

#### 四、粒子数反转条件(集居数反转)

现考察原子的一个上能级  $E_2$  和一个下能级  $E_1$ 。假设上能级  $E_2$  是由  $g_2$  个不同的能态重合在一起组成的, 亦即原子的  $g_2$  个不同的运动状态都具有相同的内部能量  $E_2$ , 则称  $g_2$  为上能级  $E_2$  的统计权重(或称简并度)。同样假设  $E_1$  能级的统计权重为  $g_1$ 。

令单位体积中处于上能级的粒子(分子或原子)数为  $n_2$ , 称  $n_2$  为处于上能级  $E_2$  的粒子数密度, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ 。同样令处于下能级  $E_1$  的粒子密度为  $n_1$ , 则玻耳兹曼分布律可写成

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2-E_1)/kT} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (1.12)$$

式中  $k$ ——玻耳兹曼常数;

$T$ ——热平衡时的绝对温度。

将式(1.12)改写成

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = e^{-(E_2-E_1)/kT} \quad (1.13)$$

式中,  $n_2/g_2$  是处于上能级  $E_2$  的一个能态上的粒子数密度,  $n_1/g_1$  是处于下能级  $E_1$  的一个能态上的粒子数密度。这里所谓的“一个能态”是指在某一能级上的粒子有不同的运动状态, 虽然具有相同的内部能量值, 但由于运动状态不同而有不同的能态。

由于  $E_2 > E_1$ , 且  $T > 0$ , 所以热平衡时, 有

$$\frac{n_2}{g_2} < \frac{n_1}{g_1} \quad (1.14)$$

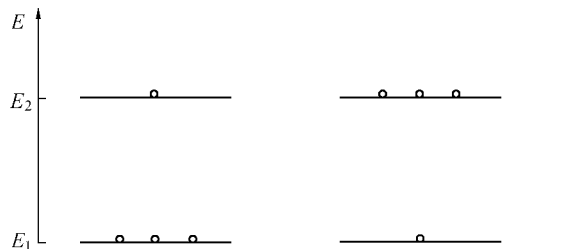
满足式(1.14)的粒子数分布, 通常称为粒子数正常分布, 见图 1.5 (a)。

在激光器工作物质内部, 由于外界能源的泵浦, 破坏了热平衡, 有可能使处于上能级  $E_2$  的粒子数密度  $n_2$  大大增加, 达到

$$\frac{n_2}{g_2} > \frac{n_1}{g_1} \quad (1.15)$$

满足式(1.15)的粒子数分布, 称为粒子数反转分布, 简称为粒子数反转, 见图 1.5 (b)。

显然, 此时激光器工作物质的内部不再处于热平衡状态。常常把式(1.15)代表的粒子数反转称为负温度分布。能在特殊



(a) 粒子数正常分布( $g_2=g_1$ ) (b) 粒子数反转分布( $g_2=g_1$ )

图 1.5 粒子数分布图